

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2000-259835

(43)Date of publication of application : 22.09.2000

(51)Int.Cl.

G06T 7/00
G01B 11/00
G01B 11/26
G06T 7/60
// H04N 13/02

(21)Application number : 11-065407

(71)Applicant : TOSHIBA CORP

(22)Date of filing : 11.03.1999

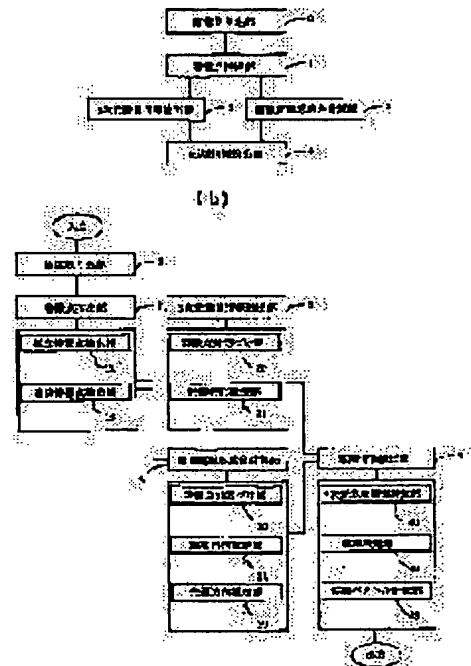
(72)Inventor : MAKI ATSUTO

(54) IMAGE PROCESSOR AND METHOD THEREFOR

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To automatically generate the shape model of an optional object in a complicated shape such as the head part of a human while satisfying practical accuracy and processing speed.

SOLUTION: By providing an image fetch part 0, a feature point extraction part 1, a three-dimensional motion information extraction part 2, an inter-image linear connection calculation part 3 and a distance information detection part 4, the three-dimensional shape model of an object is automatically generated. The image fetch part 0 fetches the time sequential image (moving image sequence) of the object and the feature point extraction part 1 performs feature point extraction required for preparing the model of the object. The three-dimensional motion information extraction part 2 correlates the extracted feature points with each other between successive images and obtains the motion information of the object, that is the change information of a three-dimensional position/posture, from the position coordinate information of the feature point group. The inter-image linear connection calculation part 3 obtains a linear connection restraint and the direction of a light source established among the time sequential images. The distance information detection part 4 decides the three-dimensional shape of the object by obtaining distances at individual points in the image and the normal vector of an object surface by searching them corresponding to geometrical luminance restraint conditions.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 22.02.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 31.08.2004

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]	
[Patent number]	3630582
[Date of registration]	24.12.2004
[Number of appeal against examiner's decision of rejection]	2004-020349
[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]	30.09.2004
[Date of extinction of right]	

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2000-259835
(P2000-259835A)

(43)公開日 平成12年9月22日(2000.9.22)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テマコード [*] (参考)
G 0 6 T 7/00		G 0 6 F 15/62	4 1 5 2 F 0 6 5
G 0 1 B 11/00		G 0 1 B 11/00	H 5 B 0 5 7
11/26		11/26	H 5 C 0 6 1
G 0 6 T 7/60		H 0 4 N 13/02	5 L 0 9 6
// H 0 4 N 13/02		G 0 6 F 15/70	3 5 0 H
審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 21 頁)			

(21)出願番号 特願平11-65407

(22)出願日 平成11年3月11日(1999.3.11)

(71)出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72)発明者 牧 淳人

兵庫県神戸市東灘区本山南町8-6-26

株式会社東芝関西研究所内

(74)代理人 100059225

弁理士 薦田 瑠子 (外1名)

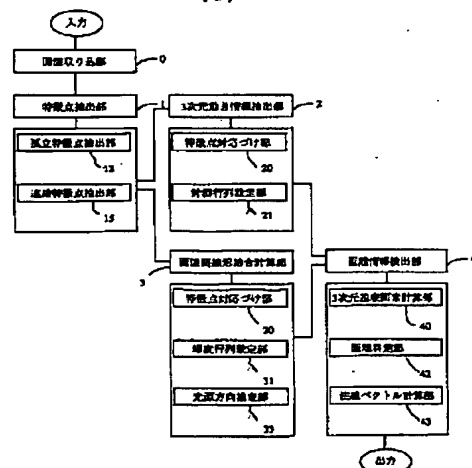
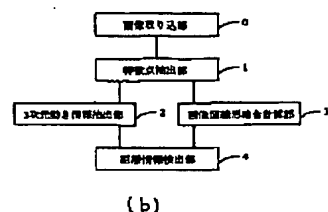
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 画像処理装置及びその方法

(57)【要約】

【課題】 人間の頭部のように複雑形状な任意の物体の形状モデルを、実用的な精度と処理速度を満足しつつ自動生成する。

【解決手段】 画像取込部0、特徴点抽出部1、3次元動き情報抽出部2、画像間線形結合計算部3、距離情報検出部4を有することにより、物体の3次元形状モデルを自動的に生成する。画像取込部0は対象物体の時系列画像(動画像系列)を取り込む。特徴点抽出部1は対象物体のモデル作成に必要な特徴点抽出を行う。3次元動き情報抽出部2は連続画像間でこれら抽出した特徴点同士の対応づけを行い、その特徴点群の位置座標情報から対象物体の動き情報、すなわち、3次元位置・姿勢の変化情報を求める。画像間線形結合計算部3は時系列画像間に成り立つ線形結合拘束及び光源の方向を求める。距離情報検出部4は、画像中各点における距離及び物体表面の法線ベクトルを幾何的輝度拘束条件にしたがって探索により求めることにより物体の3次元形状を決定する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】一つの光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理装置であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出手段と、前記特徴点抽出手段によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記時系列画像間の線形結合係数及び前記光源の光源方向を決定する光学的条件決定手段と、前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算手段と、前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定手段により決定された前記光学方向に基づいて、前記対象物体の表面各点の表面法線ベクトルを計算する表面法線ベクトル計算手段と、を具備したことを特徴とする画像処理装置。

【請求項 2】前記光学的条件決定手段は、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の輝度情報とそれら各特徴点の周囲の輝度情報を格納した輝度行列を生成する輝度行列生成手段と、前記輝度行列生成手段によって生成された輝度行列を特異値分解することにより線形結合係数を計算する線形結合係数計算手段と、前記対象物体の姿勢の変化及び任意の特徴点での面法線ベクトルに基づいて、前記線形結合係数計算手段によって計算された線形結合係数を前記光源方向に変換する光源方向変換手段と、を具備することを特徴とする請求項 1 記載の画像処理装置。

【請求項 3】距離情報計算手段は、前記時系列画像のうち特定点 A の画像を選択して基準画像とし、この基準画像中で各画素における前記対象物体までの距離 Z を設定する距離設定手段と、前記距離設定手段によって設定された距離 Z 及び前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の各時点の位置と姿勢の変化に基づいて、前記各画素と対応する画素を、前記特定点 A と異なる 3 時点以上の画像

群において決定する対応画像決定手段と、前記対応画像決定手段によって決定された画素における輝度と前記基準画像中の画素における輝度との整合の度を、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて計算する整合度合計算手段と、前記整合度合計算手段によって計算された整合度合に応じて、前記距離設定手段によって設定された距離 Z を評価して、この評価に基づいて距離情報を計算する評価手段と、を具備し、また、表面法線ベクトル計算手段は、前記光学的条件決定手段により決定された前記光源方向と前記評価手段によって計算された距離情報に基づいて、表面法線ベクトルを計算することを特徴とする請求項 1 記載の画像処理装置。

【請求項 4】前記距離情報計算手段によって計算した前記距離情報を補正する距離情報補正手段を含み、前記距離情報補正手段は、前記距離情報計算手段と前記表面法線ベクトル計算手段とによってそれぞれ計算された各画素の周辺における局所領域での前記距離情報及び表面法線ベクトルに基づいて、前記局所領域での奥行き連続性を利用して、距離 Z の推定値を計算する距離推定手段と、前記距離推定手段によって計算された距離 Z の推定値と、前記距離情報を比較する比較手段と、前記比較手段の比較結果に基づいて、前記距離情報計算手段の前記距離情報を補正する補正手段と、を具備することを特徴とする請求項 1 記載の画像処理装置。

【請求項 5】複数の光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理装置であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出手段と、前記特徴点抽出手段によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記複数の光源に対応した前記時系列画像間の線形結合係数を決定する光学的条件決定手段と、前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間

の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算手段と、
を具備したことを特徴とする画像処理装置。

【請求項 6】前記光学的条件決定手段は、
前記特徴点对应手段によって対応づけられた各特徴点の輝度情報とそれら各特徴点の周囲の輝度情報を格納した輝度行列を生成する輝度行列生成手段と、
前記輝度行列生成手段によって生成された輝度行列を前記複数の光源の組合せ毎に部分行列に分割する部分行列分割手段と、
前記部分行列分割手段によって分解された各部分行列を特異値分解することにより前記複数の光源に対応した線形結合係数を計算する線形結合係数計算手段と、
前記対象物体の姿勢変化及び任意の特徴点での面法線ベクトルに基づいて、前記線形結合係数を光源方向に変換する光源方向変換手段と、
を具備することを特徴とする請求項 5 記載の画像処理装置。

【請求項 7】前記部分行列分割手段は、
前記輝度行列生成手段によって生成された輝度行列とその転置行列を掛け合わせた行列の固有ベクトルを計算する固有ベクトル計算手段と、
前記固有ベクトル計算手段によって計算された固有ベクトルを各列に含んだ行列と、その転置行列を掛け合わせた表面行列を計算する表面行列計算手段と、
前記表面行列計算手段によって計算された表面行列の行と列の同時の並替えを、前記表面行列の非対角成分が零となるように繰り返す並替え手段と、
前記並替え手段による並べ替えの繰り返しと同じ順序で前記輝度行列の要素を並べ替え、前記表面行列の各対角ブロックの次元に対応して前記輝度行列を所定の数の部分行列に分割する分割手段と、
を具備することを特徴とする請求項 6 記載の画像処理装置。

【請求項 8】前記分割手段は、
前記輝度行列のランクを計算し、この計算されたランク数に応じた数に部分行有することを特徴とする請求項 7 記載の画像処理装置。

【請求項 9】前記距離情報計算手段は、
前記時系列画像のうち特定時点 A の画像を選択して基準画像とし、この基準画像中で各画素における前記対象物体までの距離 Z を設定する距離設定手段と、
前記距離設定手段によって設定された距離 Z 及び前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の各時点の位置と姿勢の変化に基づいて、前記各画素と対応する画素を、前記特定時点 A と異なる 3 時点以上の画像群において決定する対応画像決定手段と、
前記対応画像決定手段によって決定された画素における輝度と前記基準画像中の画素における輝度との整合の度合を、前記光学的条件決定手段により決定された前記時

系列画像間の前記複数の光源に対応した線形結合係数に基づいて計算する整合度合計算手段と、
前記整合度合計算手段によって計算された整合度合に応じて、前記距離設定手段によって設定された距離 Z を評価して、この評価に基づいて距離情報を計算する評価手段と、
を具備したことを特徴とする請求項 5 記載の画像処理装置。

【請求項 10】一つの光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理方法であって、
前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出ステップと、
前記特徴点抽出ステップによって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对应ステップと、
前記特徴点对应ステップによって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定ステップと、
前記特徴点对应ステップによって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記時系列画像間の線形結合係数及び前記光源の光源方向を決定する光学的条件決定ステップと、
前記幾何学的条件決定ステップにより決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、
前記光学的条件決定ステップにより決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算ステップと、
前記幾何学的条件決定ステップにより決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、
前記光学的条件決定ステップにより決定された前記光学方向に基づいて、前記対象物体の表面各点の表面法線ベクトルを計算する表面法線ベクトル計算ステップと、
を具備したことを特徴とする画像処理方法。

【請求項 11】複数の光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理方法であって、
前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出ステップと、
前記特徴点抽出ステップによって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对应ステップと、
前記特徴点对应ステップによって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾

何学的条件決定ステップと、

前記特徴点对応ステップによって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記複数の光源に対応した前記時系列画像間の線形結合係数を決定する光学的条件決定ステップと、

前記幾何学的条件決定ステップにより決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定ステップにより決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算ステップと、
10 を具備したことを特徴とする画像処理方法。

【請求項 12】一つの光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理方法を実現するプログラムを記憶した記録媒体であって、

前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出機能と、前記特徴点抽出機能によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特
20 徴点对応機能と、

前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定機能と、

前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記時系列画像間の線形結合係数及び前記光源の光源方向を決定する光学的条件決定機能と、

前記幾何学的条件決定機能により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定機能により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算機能と、
30

前記幾何学的条件決定機能により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定機能により決定された前記光学方向に基づいて、前記対象物体の表面各点の表面法線ベクトルを計算する表面法線ベクトル計算機能と、

を実現するプログラムを記憶したことを特徴とする画像処理方法の記録媒体。
40

【請求項 13】複数の光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理方法を実現するプログラムを記憶した記録媒体であって、

前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出機能と、

前記特徴点抽出機能によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特
50

徴点对応機能と、

前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定機能と、

前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記複数の光源に対応した前記時系列画像間の線形結合係数を決定する光学的条件決定機能と、

10 前記幾何学的条件決定機能により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定機能により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算機能と、
を実現するプログラムを記憶したことを特徴とする画像処理方法の記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、例えば工業部品などの設計を支援するための 3 次元 CAD（計算機援用設計）、3 次元 CG（コンピュータグラフィックス）を用いた映像作成、あるいは人物の顔画像を用いた H I（ヒューマンインタフェース）、ゲームへの応用を含む VR（バーチャルリアリティ）上でのアバタの作成などで用いられるものであり、対象物体のモデル記述の作成を支援することに有用な画像処理装置及びその方法に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、工業部品などの設計を支援するための 3 次元 CAD、3 次元 CG を用いた映像作成、あるいは人物の顔画像を用いた H I など、画像生成、画像処理、画像認識といった画像に関わる計算機処理のニーズが急速に拡大している。

【0003】これらの処理においては、対象とする物体の幾何形状、表面属性、そして、必要に応じて動きのデータを計算機に数値化して入力することが必要である。この入力過程をモデリングと呼び、入力された数値データをモデルと呼ぶ。現在、このモデリング作業は、人手により多くの手間を掛けて行っており、生産性やコストの面からも自動化が強く望まれている。

【0004】そこで、カメラで得た画像を解析することにより、対象物体の形状及び表面属性を自動的に求める手法の研究が行われている。すなわち、複数台のカメラを用いて 3 角測定の原理により距離を求めるステレオ法や、簡素なシステムとして一台のカメラの焦点距離を変えて得た画像を解析することにより距離を求める手法を用いて、環境に存在する物体のモデリングを自動的に行う試みがなされている。

【0005】しかしながら、一台のカメラで焦点距離を変え際には物体が静止していることが必要であり、ス

テレオ法において複数のカメラを用いる場合、一台のカメラを用いるのに比べてコストに問題がある。また、一台のカメラで動物体を複数方向から撮影し、ステレオ法を応用するためには、物体の向きと照明方向の相対変化を考慮した対応付け問題が一般に解決されておらず、例えば人間の頭部のように複雑形状、かつ、動きのある物体のモデルを実用的な精度と処理速度を満足しつつ自動的に作成する方式は未だ実現されていない。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】上述したように、従来の方法では、焦点距離を変える際には物体が静止していることが必要であり、ステレオ法において複数のカメラを用いる場合、一台のカメラを用いるのに比べてコストに問題があった。また、一台のカメラで動物体を複数方向から撮影し、ステレオ法を応用するためには、物体の向きと照明方向の相対変化を考慮した対応付け問題が一般に解決されておらず、例えば人間の頭部のように複雑形状、かつ、動きのある物体を実用的にモデリングすることはできなかった。

【0007】本発明は上記のような点に鑑みなされたもので、人間の頭部のように複雑形状、かつ、動きのある物体のモデルを一台のカメラで実用的な精度と処理速度を満足しつつ自動的に作成することのできる画像処理装置及び画像処理方法を提供することを目的とする。

【0008】また、この場合に、光源が一つのときだけでなく複数のときでも上記目的を解決できるものを提供する。

【0009】

【課題を解決するための手段】請求項1の発明は、一つの光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した1台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理装置であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出手段と、前記特徴点抽出手段によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記時系列画像間の線形結合係数及び前記光源の光源方向を決定する光学的条件決定手段と、前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算手段と、前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及

び姿勢と、前記光学的条件決定手段により決定された前記光学方向に基づいて、前記対象物体の表面各点の表面法線ベクトルを計算する表面法線ベクトル計算手段と、を具備したことを特徴とする画像処理装置である。

【0010】請求項2の発明は、前記光学的条件決定手段は、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の輝度情報とそれら各特徴点の周囲の輝度情報を格納した輝度行列を生成する輝度行列生成手段と、前記輝度行列生成手段によって生成された輝度行列を特異値分解することにより線形結合係数を計算する線形結合係数計算手段と、前記対象物体の姿勢の変化及び任意の特徴点での面法線ベクトルに基づいて、前記線形結合係数計算手段によって計算された線形結合係数を前記光源方向に変換する光源方向変換手段と、を具備することを特徴とする請求項1記載の画像処理装置である。

【0011】請求項3の発明は、距離情報計算手段は、前記時系列画像のうち特定時点Aの画像を選択して基準画像とし、この基準画像中で各画素における前記対象物体までの距離Zを設定する距離設定手段と、前記距離設定手段によって設定された距離Z及び前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の各時点の位置と姿勢の変化に基づいて、前記各画素と対応する画素を、前記特定時点Aと異なる3時点以上の画像群において決定する対応画像決定手段と、前記対応画像決定手段によって決定された画素における輝度と前記基準画像中の画素における輝度との整合の度合を、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて計算する整合度合計算手段と、前記整合度合計算手段によって計算された整合度合に応じて、前記距離設定手段によって設定された距離Zを評価して、この評価に基づいて距離情報を計算する評価手段と、を具備し、また、表面法線ベクトル計算手段は、前記光学的条件決定手段により決定された前記光源方向と前記評価手段によって計算された距離情報に基づいて表面法線ベクトルを計算することを特徴とする請求項1記載の画像処理装置である。

【0012】請求項4の発明は、前記距離情報計算手段によって計算した前記距離情報を補正する距離情報補正手段を含み、前記距離情報補正手段は、前記距離情報計算手段と前記表面法線ベクトル計算手段とによってそれぞれ計算された各画素の周辺における局所領域での前記距離情報及び表面法線ベクトルに基づいて、前記局所領域での奥行き連続性を利用して、距離Zの推定値を計算する距離推定手段と、前記距離推定手段によって計算された距離Zの推定値と、前記距離情報を比較する比較手段と、前記比較手段の比較結果に基づいて、前記距離情報計算手段の前記距離情報を補正する補正手段と、を具備することを特徴とする請求項1記載の画像処理装置である。

【0013】請求項5の発明は、複数の光源に照らされ

ている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理装置であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出手段と、前記特徴点抽出手段によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定手段と、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記複数の光源に対応した前記時系列画像間の線形結合係数を決定する光学的条件決定手段と、前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算手段と、を具備したことを特徴とする画像処理装置である。

【0014】請求項 6 の発明は、前記光学的条件決定手段は、前記特徴点对応手段によって対応づけられた各特徴点の輝度情報とそれら各特徴点の周囲の輝度情報を格納した輝度行列を生成する輝度行列生成手段と、前記輝度行列生成手段によって生成された輝度行列を前記複数の光源の組合せ毎に部分行列に分割する部分行列分割手段と、前記部分行列分割手段によって分解された各部分行列を特異値分解することにより前記複数の光源に対応した線形結合係数を計算する線形結合係数計算手段と、前記対象物体の姿勢変化及び任意の特徴点での面法線ベクトルに基づいて、前記線形結合係数を光源方向に変換する光源方向変換手段と、を具備することを特徴とする請求項 5 記載の画像処理装置である。

【0015】請求項 7 の発明は、前記部分行列分割手段は、前記輝度行列生成手段によって生成された輝度行列とその転置行列を掛け合わせた行列の固有ベクトルを計算する固有ベクトル計算手段と、前記固有ベクトル計算手段によって計算された固有ベクトルを各列に含んだ行列と、その転置行列を掛け合わせた表面行列を計算する表面行列計算手段と、前記表面行列計算手段によって計算された表面行列の行と列の同時の並替えを、前記表面行列の非対角成分が零となるように繰り返す並替え手段と、前記並替え手段による並べ替えの繰り返しと同じ順序で前記輝度行列の要素を並べ替え、前記表面行列の各対角ブロックの次元に対応して前記輝度行列を所定の数の部分行列に分割する分割手段と、を具備することを特徴とする請求項 6 記載の画像処理装置である。

【0016】請求項 8 の発明は、前記分割手段は、前記輝度行列のランクを計算し、この計算されたランク数に応じた数に部分行有することを特徴とする請求項 7 記載

の画像処理装置である。

【0017】請求項 9 の発明は、前記距離情報計算手段は、前記時系列画像のうち特定時点 A の画像を選択して基準画像とし、この基準画像中で各画素における前記対象物体までの距離 Z を設定する距離設定手段と、前記距離設定手段によって設定された距離 Z 及び前記幾何学的条件決定手段により決定された前記対象物体の各時点の位置と姿勢の変化に基づいて、前記各画素と対応する画素を、前記特定時点 A と異なる 3 時点以上の画像群において決定する対応画像決定手段と、前記対応画像決定手段によって決定された画素における輝度と前記基準画像中の画素における輝度との整合の度合を、前記光学的条件決定手段により決定された前記時系列画像間の前記複数の光源に対応した線形結合係数に基づいて計算する整合度合計算手段と、前記整合度合計算手段によって計算された整合度合に応じて、前記距離設定手段によって設定された距離 Z を評価して、この評価に基づいて距離情報を計算する評価手段と、を具備したことを特徴とする請求項 5 記載の画像処理装置である。

【0018】請求項 10 の発明は、一つの光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理方法であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出ステップと、前記特徴点抽出ステップによって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応ステップと、前記特徴点对応ステップによって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定ステップと、前記特徴点对応ステップによって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記時系列画像間の線形結合係数及び前記光源の光源方向を決定する光学的条件決定ステップと、前記幾何学的条件決定ステップにより決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定ステップにより決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算ステップと、前記幾何学的条件決定ステップにより決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定ステップにより決定された前記光学方向に基づいて、前記対象物体の表面各点の表面法線ベクトルを計算する表面法線ベクトル計算ステップと、を具備したことを特徴とする画像処理方法である。

【0019】請求項 11 の発明は、複数の光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した 1 台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処

理方法であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出ステップと、前記特徴点抽出ステップによって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応ステップと、前記特徴点对応ステップによって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定ステップと、前記特徴点对応ステップによって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記複数の光源に対応した前記時系列画像間の線形結合係数を決定する光学的条件決定ステップと、前記幾何学的条件決定ステップにより決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定ステップにより決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算ステップと、を具備したことを特徴とする画像処理方法である。

【0020】請求項12の発明は、一つの光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した1台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処理方法を実現するプログラムを記憶した記録媒体であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出機能と、前記特徴点抽出機能によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応機能と、前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定機能と、前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記時系列画像間の線形結合係数及び前記光源の光源方向を決定する光学的条件決定機能と、前記幾何学的条件決定機能により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定機能により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算機能と、前記幾何学的条件決定機能により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定機能により決定された前記光学方向に基づいて、前記対象物体の表面各点の表面法線ベクトルを計算する表面法線ベクトル計算機能と、を実現するプログラムを記憶したことを特徴とする画像処理方法の記録媒体である。

【0021】請求項13の発明は、複数の光源に照らされている動きのある対象物体を、静止した1台の画像取込み手段から時系列的に撮影して、その対象物体の形状を獲得するための少なくとも距離情報を演算する画像処

理方法を実現するプログラムを記憶した記録媒体であって、前記画像取込み手段によって取込まれた時系列画像から前記対象物体の特徴点を抽出する特徴点抽出機能と、前記特徴点抽出機能によって抽出された前記時系列画像の各時点の画像中に含まれる特徴点同士を対応づける特徴点对応機能と、前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点の位置座標情報に基づいて、前記時系列画像の各時点における前記対象物体の位置と姿勢の変化を決定する幾何学的条件決定機能と、前記特徴点对応機能によって対応づけられた各特徴点と、その周囲の輝度情報に基づいて、前記複数の光源に対応した前記時系列画像間の線形結合係数を決定する光学的条件決定機能と、前記幾何学的条件決定機能により決定された前記対象物体の前記時系列画像中の各時点の位置及び姿勢と、前記光学的条件決定機能により決定された前記時系列画像間の線形結合係数に基づいて、前記対象物体の各点への距離情報を計算する距離情報計算機能と、を実現するプログラムを記憶したことを特徴とする画像処理方法の記録媒体である。

【0022】以上により、本発明は、対象物体の撮影によって得られる時系列画像を用い、その時系列画像の各時点の画像に含まれる特徴点同士を対応づけ、その対応づけられた各特徴点の位置座標情報から対象物体の各時点の3次元の位置と姿勢、したがって、時系列画像間の幾何学的結合条件を求め、一方でその対応づけられた各特徴点の輝度情報から時系列画像間の光学的結合条件及び光源の方向を計算し、時系列画像間の幾何学的及び光学的結合条件を用いて各画素における距離情報及び表面法線ベクトルを獲得し、さらに表面法線ベクトルを利用して距離情報を補正したものを上記対象物体のモデル情報として出力するものである。

【0023】なお、表面法線ベクトルは距離情報の補正以外に映像の生成に利用できる。

【0024】このような構成により、例えば人間の頭部のように複雑形状、かつ、動きのある物体を対象に、一台のカメラを入力装置としてそのモデルを自動作成することができる。

【0025】なお、本発明は、この意味で複数台のカメラを用いるUS Patent 5475422（参考文献1：US Patent 5475422- Dec. 12, 1995 (NTT) "Method and apparatus for reconstructing three-dimensional objects"）等の提案とは内容を異にする。

【0026】また、以下で発明の実施の形態として対象物体の動きを算出するためにC. Tomasi 等による因子分解法（参考文献2：C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method" International Journal of Computer Vision Vol. 9:2 pp 137-154, 1992）を用いており、その際、一撃計算により特定に選択された点の3次元位置が同時に求まるが、これの外挿を基本とするも

デル化は関連して別途”特願平9-767号”として出願している。また、対応づけに基づくステレオ法を応用することで対象物体の3次元表面全体を復元する方法についても”特願平9-273573号”として出願している。

【0027】これに対し本発明は、3次元の奥行きと表面の法線ベクトルを同時推定しようとするものであり、物体形状の精度の向上に寄与するものである。

【0028】

【発明の実施の形態】第1の実施形態

以下、本発明の第1の実施形態について、人間の頭部の表面モデルを自動生成する場合を例にとって説明する。

【0029】図1(a)に本実施形態の基本的な構成例を示し、図1(b)に本実施形態の詳細な構成例を示す。

【0030】画像取込部0により得られた動画像系列から、まず特徴点抽出部1により、モデル作成を行う物体の表面を構成する特徴点を抽出する。

【0031】次に、3次元動き推定部2により、連続画像間でこれら抽出した特徴点同士の対応づけを行い、対応づけられた特徴点群の2次元座標から生成される行列を係数行列として含む関係式を変形操作することにより、頭部の位置・姿勢を求める。

【0032】また、線形結合係数計算部3により、対応づけられた各特徴点の輝度情報から生成される行列を係数行列として含む関係式を変形操作することにより、画像間の線形結合係数を求める。

【0033】最後に、距離情報検出部4により、頭部の位置・姿勢と画像間の線形結合係数にしたがって、幾何学輝度拘束条件に基づいて、物体への距離情報を検出し、形状復元を行う。

【0034】次に、上記基本構成における各構成要素の構成例について説明する。

【0035】(a) 特徴点抽出部

図2に、特徴点抽出部1の詳細な構成例を示す。

【0036】まず平滑化処理部10において、抽出する原画像に平滑化処理を施す。この処理をデジタルフィルタで実現する場合は、例えば、

【数1】

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

という係数を持つサイズ3の空間フィルタで実現できる。

【0037】この処理は、次の2次元差分処理部11、及び方向別分散値計算部14における、ノイズ低減のための前処理として行われる。二次空間差分処理部11では、上記平滑化処理結果に対し二次空間差分処理を施す

ことにより、孤立した特徴点部分の明度強調を行う。この処理をデジタル空間フィルタで実現する場合は、例えば、

【数2】

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

という係数を持つサイズ3の空間フィルタで実現できる。

【0038】次に、孤立特徴点抽出部12において、この明度強調結果で適当に設定した閾値以上の部分を抽出することにより、例えば頭部における黒子のような孤立した特徴点を抽出し、この座標値を記憶部に順次格納する。

【0039】さらに、局所マスク設定部13では、前記平滑化処理部10の結果に対し、例えば頭部における目尻、唇の端点のような連続特徴点を抽出するための局所マスク領域を順次設定する。

【0040】連続特徴点は、例えば目尻であれば目領域の上輪郭と下輪郭の交差する点、唇の端点であれば上唇の輪郭と下唇の輪郭の交差する点、というように、複数の輪郭線(エッジ)の交差部分、すなわち複数の方向に輝度勾配が強い点として求められる。マスク領域の大きさは、抽出する特徴点を構成する輪郭線(エッジ)の長さとな必要となる演算量を考慮して最適となるように設定する。

【0041】次に、方向別分散値計算部14において、この設定された各局所マスク内の方向別分散値を計算する。この方向としては例えば、垂直、水平、右45°、左45°の4方向を選択し、局所マスク内の各方向に連続した画素の明度値を用いて、各方向別分散値を計算する。

【0042】次に、連結特徴点抽出部15において、上記方向別分散値計算部14において計算された方向別分散値が、2つ以上の方向に対し一定閾値以上の値を有する局所マスクの中心点を連結特徴点として抽出し、この座標値を記憶部に順次格納する。

【0043】(b) 3次元動き情報抽出部

次に、前記3次元動き情報抽出部2の詳細な構成例について、図3を用いて説明する。

【0044】特徴点对応づけ部20において、前記特徴点抽出部1で抽出された孤立特徴点群、及び連結特徴点群の、連続時系列画像間における対応づけを行う。

【0045】図4に、上記特徴点对応づけ部20の詳細な構成例を示す。

【0046】まず、特徴点選択部200で、連続時系列画像間における対応づけを行う特徴点の組を選択する。

【0047】次に、局所マスク設定部201において、

これら特徴点を含む 5×5 や 7×7 などのサイズを持つ局所マスク領域を各々の画像中に設定する。

【0048】次に、相関値計算部202において、これら局所マスク領域間の相関係数の値を計算する。

【0049】次に、対応判定部203において、上記相関係数値が閾値以上、かつ最大となる組を、対応づけが求まったものとして記憶部に格納する処理を、抽出された各特徴点について順次行う。

【0050】次に、計測行列設定部21では、これら対応づけの得られた特徴点の画像中の座標値を用いて、3次元動き情報を求めるための計測行列を作成する。

【0051】本実施形態では、モデル作成を行う対象そのものの奥行きに対し、観測に用いるカメラが対象から十分遠方にある（正射影の条件を満たす）場合について、因子分解法を適用した例について述べる。この条件*

$$X'f_p = Xf_p - A_f, Y'f_p = Yf_p - B_f \quad (2)$$

とする。このとき計測行列Wは、

【数5】

$$\begin{pmatrix} X'11 & X'12 & \dots & X'1P \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X'F1 & X'F2 & \dots & X'FP \\ Y'11 & Y'12 & \dots & Y'1P \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y'F1 & Y'F2 & \dots & Y'FP \end{pmatrix}$$

$$M = (x_1, \dots, x_F, y_1, \dots, y_F)^T \quad (4)$$

は $2F \times 3$ の行列、

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_P) \quad (5)$$

は $3 \times P$ の行列である。この分解は、例えば特異値分解処理を用いることにより実行される。

【0054】ここで、Sにおける成分 S_p は対応づけられたp番目の特徴点の3次元位置(X_p , Y_p , Z_p)である。一方、Mの行列の成分のうち

(x_f , y_f)は、f番目の画像の基本ベクトルであり、動画像系列における各時点での画像の中心位置を与えており、これらの差からフレーム間の物体の3次元の動き情報、すなわち位置と姿勢の変化を決定することができる。

【0055】なお、特異値分解は一般に任意性を有するが、Mの要素ベクトルが正規直交系を構成することなどの適当な拘束条件の下に分解を一意に決定できる（詳細は参考文献2）。

【0056】これにより、動画像系列中にある時点での入力画像の任意の点の座標と、その点までの推測される距離Zから、他の画像において対応する点の座標を算出

*は例えば顔を撮影する場合、通常カメラを特に遠方に配置しなくても満たされる。

【0052】対応づけが得られた特徴点の組において、f枚目の画像中のp番目の特徴点の位置を(Xf_p , Yf_p)とする。また、画像の相枚数をF、特徴点の組の数をPとする。

【0053】f枚目の画像中の特徴点群の重心位置を(A_f , B_f)とするとこれらは、

【数3】

$$A_f = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P Xf_p, B_f = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P Yf_p \quad (1)$$

として与えられる。次にこれらの座標間の差をとって、

【数4】

※として設定される。この計測行列Wは、 $2F \times P$ の行列である。次に、計測行列変形操作部22では、上記計測行列Wに対し変形操作を行って

【数6】

$$W = MS \quad (3)$$

と2つの行列の積の形に分解する。ただし、

【数7】

することができる。

【0057】(c)画像間線形結合計算部

次に、前記画像間線形結合計算部3の詳細な構成例について、図5を用いて説明する。

【0058】ここで、一般に1つの無限遠点光源を考えるとある画素 x_i の輝度Iは、その画素に対応する物体表面上の点の内向き3次元単位法線ベクトルに表面反射率を乗じた量 B_i と、点光源の光の方向を示す3次元単位ベクトルに光源の強さを乗じた量 s^1 との内積、すなわち

【数9】

$$I = B_i^T s^1 \quad (6)$$

で表現されることに注意されたい（図8参照）。またこれに基づいて、単一点光源下で得られる完全拡散反射面を持つ凸物体の任意の画像は、同一平面状にない3個の単一点光源によって対象物体を同じ方向から撮影した

任意の3枚の画像を基底画像とし、それらの線形結合で表現できることがShashua (参考文献3: A. Shashua "Geometry and photometry in 3D visual recognition" Ph. D. Thesis, Dept. Brain and Cognitive Science, MIT, 1992.) によって示されている。

*【0059】いま、物体表面上の点が動画像系列上の点 $x(j)$ に投影されるとき、無限遠の n_i 個の点光源による反射をLambertianモデルで表現すると、 j 番目の画像の i 番目の点の輝度値は、

$$I_i(j) = \sum_{k=1}^{n_k} \max(\mathbf{B}_i^T \mathbf{R}(j)^T \mathbf{s}^k, 0) \quad (7)$$

与えられる。ただし、上式において、 \mathbf{B}_i は物体表面の内向き単位法線ベクトルに表面反射率を乗じたものであり、 $\mathbf{R}(j)$ は最初の画像から j 番目の画像までの物体の回転を表す行列であり、 \mathbf{s}^k は k 番目の光の方向を示す単位ベクトルに光源の強さを乗じたものであ

※る。ある光源によって画素が照射されていないと内積が負の値をとるので $\max(\cdot, 0)$ とする必要がある。

【0060】式(7)は次のように書くこともできる。

【0061】

【数11】

$$I_i(j) = \mathbf{B}_i^T \mathbf{s}'(j) \quad (8)$$

ただし、

$$\mathbf{s}'(j) = \sum_{k=1}^{n_k} \mathbf{R}(j)^T D^k(j) \mathbf{s}^k \quad (9)$$

は光源に関する因子であり、 $D^k(j)$ は k 番目の光源が j 番目の画像を照射しているかどうかで、1または0の値をとる。

【0062】画像中の特徴点が n_i 個であり、 n_j ★

★枚の動画像系列を解析する場合、以下の行列表現をすることができる。

【0063】

【数12】

$$\mathbf{I} = \mathbf{B} \mathbf{s} \quad (10)$$

なお、 \mathbf{I} は $I_i(j)$ を要素とする $n_i \times n_j$ の行列であり、 \mathbf{B} は \mathbf{B}_i^T を各行とする $n_i \times 3$ の行列であり、 \mathbf{s} は $\mathbf{s}'(j)$ を各列とする $3 \times n_j$ の行列である。

【0064】3次元動き抽出部2中で記述済みの特徴点対応づけ部20で、 n_j 枚通して全ての動画像系列中の各々の特徴点に対して対応づけを行うことで、対応づけされた特徴点の輝度値 $I_i(j)$ を \mathbf{I} において記録することができる。

☆【0065】輝度行列設定部31では、これら対応づけの得られた特徴点における輝度値を用いて、輝度行列を作成する。

【0066】次に、単一点光源を考えると輝度行列変形操作部32では、計測行列 \mathbf{I} に対し例えば特異値分解等を行うことによって、rank 3の行列による近似表現を得ることができる。

【0067】

【数13】

$$\mathbf{I} = \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{s}} \quad (11)$$

ただし、

$$\tilde{\mathbf{B}} = [\tilde{\mathbf{I}}_1, \tilde{\mathbf{I}}_2, \tilde{\mathbf{I}}_3] \quad (12)$$

は3次元基底画像を表す $\tilde{\mathbf{I}}_1, \tilde{\mathbf{I}}_2, \tilde{\mathbf{I}}_3$ から構成され、

$$\tilde{\mathbf{s}} = [\tilde{s}(1), \tilde{s}(2), \dots, \tilde{s}(n_j)] \quad (13)$$

なお、 \mathbf{B} の上に「 \sim 」が付くのは、 \mathbf{B} について分解が任意性を伴っていることを意味する。以下、 \mathbf{I}, \mathbf{s} 等の他の文字も同様である。

は、線形結合係数を含む $3 \times n_j$ の行列である。

【0068】よく知られているように特異値分解による分解は一意ではなく、一般には任意の 3×3 正則行列

\mathbf{A} を用いて次のように表現される。

【0069】

【数14】

$$\tilde{B}\tilde{s} = (\tilde{B}A^{-1})(A\tilde{s}).$$

特定の A で、

$$Bs = (\tilde{B}A^{-1})(A\tilde{s})$$

が満足されるとき $s = A\tilde{s}$ によって光の方向を各列にふくむ行列 s が求まるが、線形結合係数を含む $3 \times n_j$ の行列が求まれば、次の距離情報検出には十分である。

しかし、更に光源方向推定部33によって

$$s = A\tilde{s} \quad (14)$$

を満たす行列 A を計算すれば距離情報と同時に光源の方向が求まる。そのような行列 A は以下のように計算することができる。

【0070】まず、式(11)の行列 s に含まれる光源の物理的な意味に立ち戻ると、その解釈は次のようになる。*

$$s(j) = R(j)^T s(1) \quad (15)$$

によって表されるベクトルとなる。ここで $R(j)$ は最初のフレームから j 番目のフレームにかけての物体の 3×3 次元回転行列であり、回転行列の転置を乗じることが、光源が相対的に逆向きの回転をしているという解釈に基づいている。回転行列は、前記3次元動き抽出部2※

$$A\tilde{s}(j) = R(j)^T A\tilde{s}(1) \quad (16)$$

が得られる。式(16)は基準画像に対して参照画像1フレームにつき3本の方程式を与えるので、参照画像が3フレームあれば方程式が9本得られ、これらを適当に展開すると行列 A の9個の要素についての同次方程式を得る。

【0072】しかしその解には自由度が3残っており、同次方程式のみから行列 A を一意に決定することはできない。これは物理的に条件が不足していることを意味しており、最初のフレームにおける光源と物体の初期配★

$$I_i(j) = B_i^T A\tilde{s}(j) \quad (17)$$

の関係式が得られるが、ここで条件より法線方向 B_i^T は既知、サンプル点 i では予め対応づけが取れていることから輝度 $I_i(j)$ の値もわかっており、行列 I の特異値分解で得られた $\tilde{s}(j)$ を代入すると行列 A に関する方程式が3本追加される。

以上に述べた行列 A に関する条件(16)及び(17)を入力 ☆【数18】
画像が3枚の場合についてまとめて整理すると、 ☆40

$$\begin{aligned} A\tilde{s}(2) &= R(2)^T A\tilde{s}(1) \\ A\tilde{s}(3) &= R(3)^T A\tilde{s}(1) \\ I_i(j) &= B_i^T A\tilde{s}(j) \quad (j=1,2,3) \end{aligned} \quad (18)$$

となる。特異値分解で得られる疑似的な光源ベクトル \tilde{s} に対し、これらを解いて得られる行列 A を式(14)のように掛け合わせることで真の光源ベクトルが決定できる。

を用いて説明する。

【0073】基本的な概念は動画像中からある基本画像を選択し、この画像中で顔に相当する部分の各画素において他の画像との幾何的輝度拘束—幾何学的に対応する点における輝度間に成立する線形拘束—にしたがって距離を推定するものであり、前記3次元動き情報抽出部2と前記画像間線形結合計算部3の結果の双方を利用するものである。

【0074】この概念は図7に4枚の時系列画像を用いて示されるごとくである。

【0075】基準画像の任意の画素の輝度 I_i (1) は、他の3枚の画像において幾何学的に対応している点の輝度 I_i (2), I_i (3), I_i (4) の線形結合で表される。なお図中、対象物体の動きは撮影するカメラの逆位相の動きとして解釈されている。

10 【0077】ある距離 Z を仮定するときこれに対する3次元基底画素計算部40と評価関数計算部41は以下のように構成する。

【0078】

【数19】

*
まず、3次元基底画素計算部40においては、求める基底画像(3次元ベクトル)を $\hat{B}_i^T(Z)$ とおき、上記 $I_i(j)$ ($j=1\ldots4$) をまとめて $I_i(j; Z)$ と記すと、前記画像間線形結合計算部3によって線形結合係数 \hat{s} は既に求まっているため、これらのあいだに

$$I_i^T(j; Z) = \hat{B}_i^T(Z) \hat{s} \quad (19)$$

ただし、 \hat{B} の上に「 \wedge 」が付くのは、 B の推定値を意味する。なお、以下に示す I などの他の文字も同様である。

なる拘束式が成立し、これを最小2乗の意味でもっとよ ※【0079】

く満足する解として次の3次元ベクトルを得る。 ※【数20】

$$\hat{B}_i^T(Z) = I_i^T(j; Z) \hat{s}^T (\hat{s} \hat{s}^T)^{-1} \quad (20)$$

次に、評価関数計算部41においては、上記により得られた3次元ベクトル

$\hat{B}_i^T(Z)$ と上記線形結合係数 \hat{s} によって合成される輝度の推定値 $\hat{I}_i^T(j; Z)$ 、すなわち

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{B}_i^T(Z) \hat{s} \quad (21)$$

と実際の輝度 $I_i^T(j; Z)$ との自乗誤差に基づいた次式による評価関数 $E_i(Z)$ を計算する。

$$E_i(Z) = \sum_{j=1}^4 (I_i(j; Z) - \hat{I}_i(j; Z))^2 \quad (22)$$

距離判定部42では、推測の距離 Z を変化させつつ上記評価関数 $E_i(Z)$ の計算を行い、評価関数を最小(理想的には零)とする Z をもってその点での距離とする。以上の操作を画像上の各点において実行することで画像全

【0080】ここで、前記光源方向推定部33により光★

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{B}_i^T(Z) \hat{s} \quad (23)$$

$\hat{B}_i^T(Z)$ は距離 Z の仮定に従って物理的に物体表面の濃淡の強さを大きさとする法線ベクトルを表すことになる。つまり奥行きパラメータ Z を探索する過程で、推定値 Z が正しいとき $\hat{B}_i^T(Z)$ も正しい値をとり、物体表面法線ベクトルが推定できる。

*【0076】すなわち、1番目の画像において顔表面のある点 X_i が投影された画素の輝度 $I_i(1)$ を考えるとき、その点 X_i への距離 Z を仮定、これにしたがって同じ点 X_i が異なる時点の画像において投影された輝度 $I_i(2)$, $I_i(3)$, $I_i(4)$ を推測し、これらの輝度が、画像間線形結合計算部で計算された線形結合係数に基づいた線形結合拘束を正しく満たす度合を評価することで、正しい距離 Z を探索によって求めることができる。

10 【0077】ある距離 Z を仮定するときこれに対する3次元基底画素計算部40と評価関数計算部41は以下のように構成する。

【0078】

【数19】

*
まず、3次元基底画素計算部40においては、求める基底画像(3次元ベクトル)を $\hat{B}_i^T(Z)$ とおき、上記 $I_i(j)$ ($j=1\ldots4$) をまとめて $I_i(j; Z)$ と記すと、前記画像間線形結合計算部3によって線形結合係数 \hat{s} は既に求まっているため、これらのあいだに

$$I_i^T(j; Z) = \hat{B}_i^T(Z) \hat{s} \quad (19)$$

ただし、 \hat{B} の上に「 \wedge 」が付くのは、 B の推定値を意味する。なお、以下に示す I などの他の文字も同様である。

※【0079】

※【数20】

$$\hat{B}_i^T(Z) = I_i^T(j; Z) \hat{s}^T (\hat{s} \hat{s}^T)^{-1} \quad (20)$$

次に、評価関数計算部41においては、上記により得られた3次元ベクトル

$\hat{B}_i^T(Z)$ と上記線形結合係数 \hat{s} によって合成される輝度の推定値 $\hat{I}_i^T(j; Z)$ 、すなわち

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{B}_i^T(Z) \hat{s} \quad (21)$$

と実際の輝度 $I_i^T(j; Z)$ との自乗誤差に基づいた次式による評価関数 $E_i(Z)$ を計算する。

$$E_i(Z) = \sum_{j=1}^4 (I_i(j; Z) - \hat{I}_i(j; Z))^2 \quad (22)$$

★源の方向がすでにわかっている場合は、さらに法線ベクトル計算部43によって物体表面の法線ベクトルを計算できる。この場合、前記評価関数計算部41における式(21)は次式で置き換えられる。

【0081】

【数21】

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{B}_i^T(Z) \hat{s} \quad (23)$$

$\hat{B}_i^T(Z)$ は距離 Z の仮定に従って物理的に物体表面の濃淡の強さを大きさとする法線ベクトルを表すことになる。つまり奥行きパラメータ Z を探索する過程で、推定値 Z が正しいとき $\hat{B}_i^T(Z)$ も正しい値をとり、物体表面法線ベクトルが推定できる。

また、法線ベクトルが得られると、距離補正部44で局所領域での奥行きの連続性を利用し、各画素の周辺画素

での奥行き Z 。と法線ベクトル \hat{B}_i^T から奥行きの推定値 Z 。を計算することもできる。周辺の画素の範囲

は連続性を考慮する度合に応じて決定し、奥行き推定値はその範囲内の各画素での計算値の例えば平均値を取る。簡単には上下左右の4画素だけを考慮しても効果が見られるが、範囲を ω とし、そこに含まれる画素数を n として Z_e を定式化すると

$$Z_e = \frac{1}{n} \sum_{k \in \omega} (Z_{0k} + D_k \text{grad}_k) \quad (24)$$

となる。ただし Z_{0k} は画素 k における奥行きの一次近似、 D_k は画素 k から画素 i までの距離、 grad_k は画素 k から画素 i を見た方向の距離勾配であり各画素の法線方向 B^T から算出される。前記距離判定部42の奥行き探索において、式(22)による誤差関数 $E_i(Z)$ の極小ピークが複数存在する場合は、それぞれを候補とした上で式(24)による奥行き推定値 Z_e に最も近い極小ピークをもって真の奥行きとすることができる。こうした処理は一種のヒューリスティックとも呼べ、また結果としてスムージング効果を持つことになるが、奥行き探索の結果から直接意味のある値のみを残すことを可能とする。

【0082】変更例 1

なお、本発明は上記実施形態で記載した内容に限定されるものではない。

【0083】例えば、距離判定部42で距離 Z を推測する際、3次元動き情報抽出部において物体の動きと同時に抽出される特徴点の3次元位置情報 S を用いて距離 Z の推測範囲を限定することができる。

【0084】光源についてはさらに、ここで記述した単一点光源における議論を基に、その組合せとして一般光源へ拡張した環境へも対応することが可能である。このように本発明は物体の幾何的条件と光学的条件を組み合わせることにより様々な拡張が可能である。

【0085】第2の実施形態

図9に第2の実施形態の詳細な構成例を示す。

【0086】第1の実施形態では、単一光源の場合について説明したが、第2の実施形態では、複数光源が存在*

$$I = (B \mid B) D_k \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} \quad (k = 0, 1, 2, 3) \quad (19)$$

ここで、 s_1 と s_2 は光源 l_1 と l_2 に対応した列を含み、 D_k ($k = 0, 1, 2, 3$)は 3×3 単元行列 E 及び零行列からなる次の4種類の 6×6 行列のいずれかで、輝度行列 I の各要素に寄与している光*

$$D_0 = \begin{pmatrix} E & \\ & E \end{pmatrix}, D_1 = \begin{pmatrix} E & \\ & 0 \end{pmatrix}, D_2 = \begin{pmatrix} 0 & \\ & E \end{pmatrix}, D_3 = 0.$$

D_0 は特徴点が l_1 と l_2 の両方の光源に照射されている場合、 D_1 及び D_2 は特徴点が各々 l_1 または l_2 の片一方に照射されている状況に対応す

*する場合について説明する。なお、画像間線形結合部計算部3の式(18)までは、第1の実施形態と同様の処理を行う。そのために、式(1)から式(18)までは、第1の実施形態を参照し、式(19)以降については、第2の実施形態の式番号を参照する。

【0087】したがって、図10に示す画像間線形結合部計算部3の輝度行列変形操作部32において複数点光源が存在する場合を考える。

【0088】最も単純な場合として、全ての点光源が物体表面上の全ての点を照射している状況では、それらの点光源の重ね合わせに等価な一つの光源を仮定し、上述の単一光源における方法をあてはめることで線形結合係数を計算することができる。さらに光源方向推定部33で光源の方向が推定できる。しかし、物体表面上の多くの点は実際には複数光源の部分的な組合せによって照射されており、その組合せは各点においてまちまちである。

【0089】すなわち、輝度行列設定部31で設定した輝度行列は、様々な光源の組合せによって生じた輝度が格納されることになる。この状況では輝度行列分割部30を経て輝度行列変形操作部32以降の処理を行う必要がある。

【0090】輝度行列分割部30では、輝度行列を共通する組合せの光源によって生じた輝度のみを含んだ部分行列へ各行の並べ替えによって分割し、正準化する。この分割ができると、輝度行列変形操作部32以降の処理は各部分行列ごとに行い、対応する線形結合係数及び光源の方向を計算すればよい。

【0091】以下、部分行列への分割を一般性を失うことなく2つの点光源が存在する場合を例にとって説明する。

【0092】まず、2点光源(l_1 , l_2 とおく)における輝度行列は単一光源下における関係式(10)に対応し、次のように表現できる。

【0093】

【数23】

※源の組合せに対応している。

【0094】

【数24】

る。特徴点が完全な陰の部分にある場合がもしあれば、その場合の輝度値は0であり D_3 が対応する。

【0095】いま、 n_i 個の特徴点のうち n_0 個が

入力画像列を通して光源 l_1 と l_2 の両方に照射されており、 n_1 個が光源 l_1 のみに、また n_2 個が光源 l_2 に照射されているとする。

【0096】つまり、陰になる部分を除外して考え $n_i = n_0 + n_1 + n_2$ とする。

【0097】ここで、輝度行列の分割の方法を説明する前に、分割した部分行列の表現形式について述べてお *

*く。何らかの方法で特徴点の分類が照射する光源の組合せごとにわかっている状況を考え、これにしたがって輝度行列 I の各々 n_k 個の特徴点に対応する部分行列 I_k ($k=0, 1, 2$) への分割がなされているとする。このとき式(19)は次のように表現でき、

【数25】

$$I = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_0 & & \\ & B_1 & \\ & & B_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} \quad (20)$$

各部分輝度行列は式(10)と同様

$$I_k = B_k s_k \quad (k=0, 1, 2) \quad (21)$$

と表される。ここで $n_k \times 3$ 行列 B_k の各行に係わる特徴点は D_k ($k=0, 1, 2$) に対応する光源の組に照射されており、また s_0 は光源 l_1 と l_2 ※

※を重ね合わせたベクトル
【数26】

$$s_0 = s_1 + s_2$$

(22)

であることに注意する。

【0098】式(20)では陰の部分を除外して考えることで D_0 に対応する I_0 を無視しているが、更に光源 l_1 が物体全体を、光源 l_2 が物体の一部分のみを照射していると考えても一般的な議論には差し支えな ★

20★い。これにより部分行列 I_2 を省略するとき ($n_i = n_0 + n_1$)、輝度行列は次のような正準型となる。

【0099】

【数27】

$$\bar{I} = \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_0 & \\ & B_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

式(23)で便宜上

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} B_0 & \\ & B_1 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

$$\bar{s} = \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

とおき

$$\bar{I} = \bar{B} \bar{s}. \quad (26)$$

を得る。さて、輝度行列分割部30で上記の様な正準型輝度行列 \bar{I} を得るためには、本質的に特徴点の分類にあたって照射する光源の組合せに関する知識が必要である。

式(23)からも明らかであるように部分行列 I_0 と I_1 のランクは高々3であり、正準型の輝度行列 \bar{I} 全体としてのフルランクは退化のない場合で6となる。

同じことが輝度行列 I にもそのまま当てはまるため、入力画像の枚数を6枚以上、つまり $n_i \geq 6$ としておく（一般に光源の組合せが n_m とおりある場合は $3n_m$ 枚を用いることになる）。

【0100】ここで、輝度行列 I の任意の行が n_i

次元輝度空間 R^{n_i} の一点を表すものと解釈すると、部分行列 I_0 の各行は3次元部分空間 L_0 の一点を、また部分行列 I_1 の各行は別の3次元部分空間 L_1 の一点を表すことになる。

50 【0101】したがって、特徴点を分類する問題は、空

間 R^{n_i} における n_i 個の特徴点群を2つの異なる3次元部分空間に分けることに帰着される。

* することで現実的に分類を行う方法について述べる。

【0103】

【0102】以下では、まずこの分類が数学的に可能であることを述べた上で、表面行列と呼ばれる行列を導入*

【数28】

n 次元空間 R^n の N 点 $p^\alpha (\alpha = 1, \dots, N)$ を考え、添字集合 $\mathfrak{G} = 1, \dots, N$ を次の様に m 個の部分集合に分割する。

$$\mathfrak{G}_1 \cup \dots \cup \mathfrak{G}_m = \mathfrak{G}, \quad \mathfrak{G}_1 \cap \dots \cap \mathfrak{G}_m = \emptyset.$$

第 i 番目の集合 $\mathfrak{G}_i (\alpha \in \mathfrak{G}_i)$ の張る部分空間を L_i とし、その次元を r_i とする。そして $r = \sum_{i=1}^m r_i$ とおき、 m 個の部分空間 $L_i (i = 1, \dots, m)$ は互いに線形独立であると仮定する。すなわち直和空間 $L_1 \oplus \dots \oplus L_m$ は R^n の r 次元空間部分空間であるとする。 $N \geq r$ と仮定し、 $N \times N$ 計量行列 $G = (G_{\alpha\beta})$ を次のように定義する。

$$G_{\alpha\beta} = (p^\alpha, p^\beta). \quad (27)$$

定義よりこれはランク r の半正値対称行列である。その固有値を $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_N$ (最初の r 個のみが零でない)とし、対応する固有ベクトルの正規直交系を $\{v_1, \dots, v_N\}$ とする。そして $N \times N$ 作用行列※

※ $Q = (Q_{\alpha\beta})$ を次のように定義する。

【0104】

【数29】

$$Q = \sum_{k=1}^r v_k v_k^T. \quad (28)$$

このとき次の関係があることが一般に知られている⁵。 $\alpha \in \mathfrak{G}_i, \beta \in \mathfrak{G}_j, i \neq j$ のとき $Q_{\alpha\beta} = 0$ 。

この性質を2点光源下の輝度空間 R^n にあてはめ、 $n_i \times n_i$ 計量行列 $G = (G_{\alpha\beta})$ を再定義する。

$$G_{\alpha\beta} = I I^T = (I^\alpha, I^\beta) \quad (29)$$

すなわち、 α と β は2つの任意の特徴点、 I^α と I^β は輝度行列 I のうちでそれらに対応する行とする。定義よりこれはランク6の半正値対称行列である。その固有値を $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{n_i}$ (最初の6個のみが非★

★零)とし、対応する固有ベクトルの正規直交系を $\{v_1, \dots, v_{n_i}\}$ とする。そして $n_i \times n_i$ 作用行列 $I-I = (H_{\alpha\beta})$ を次のように定義し

【数30】

$$H = \sum_{i=1}^6 u_i u_i^T = U U^T \quad (30)$$

これを表面行列と呼ぶ。このとき上記と同様の考察により $I^\alpha \in I_0, I^\beta \in I_1$ であれば $H_{\alpha\beta} = 0$ である。

つまり、この表面行列 $I-I$ は各特徴点对 α と β の分類の可能性を示すもので、2点を照射する光源の組合せが共通であるか異なるかを $H_{\alpha\beta}$ の計算に基づいて判断できる。 $H_{\alpha\beta}$ が非零であれば光源の組合せが共通で、光源の組合せが異なれば $H_{\alpha\beta}$ の値が零となる。表面行列 $I-I$ を求めることで特徴点全てを対象としてこの判断を組織的に行う方法を以下で述べる。

☆40

$$I = U \Sigma V^T.$$

(31)

対角行列 Σ が I の最も大きい6つの特異値を成分に含む一方、行列 U と V は $U^T U = V^T V = E_{6 \times 6}$ (単位行列)なる正規直交行列で、その各々が $I I^T$ と $I^T I$ の固有ベクトルを列とする。従って $n_i \times n_i$ 表面行列 H は U の最初の6列のみを用いて生成され

$$H = U U^T \quad (32)$$

となる。

一意に計算できるばかりか、輝度行列 I の行の順序を

【0108】定義から表面行列 $I-I$ は輝度行列 I から

50

入れ替えても、その値の組 $H_{\alpha\beta}$ は一定のままで並び方

が入れ替わるのみである。つまり輝度行列 \mathbf{I} の行 α と * のまま同時に入れ替わることになる。

β を入れ替えると、行列 \mathbf{I} の対応する行 α と β が入れ 【0109】

替わり、結果として表面行列 $\mathbf{I-I}$ の行 α と β が一定の値* 【数32】

ここで値の組が一定であることから、まず表面行列の正準型 \mathbf{H} を輝度行列の正準型 \mathbf{I} に

対応させて考察する。輝度行列の正準型 \mathbf{I} の輝度部分行列 \mathbf{I}_k のそれぞれに特異値分解を施すと、

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_k &= \mathbf{U}_k \Sigma_k \mathbf{V}_k^T \\ &= (\mathbf{U}_k \Sigma_k^{1/2} \mathbf{A}_k) (\mathbf{A}_k^{-1} \Sigma_k^{1/2} \mathbf{V}_k^T), (k=0,1)\end{aligned}\quad (33)$$

である。これにより輝度行列の正準型 \mathbf{I} は次のようにも表現できる。

$$\mathbf{I} = (\mathbf{U} \Sigma^{1/2} \mathbf{A}) (\mathbf{A}^{-1} \Sigma^{1/2} \mathbf{V}^T), \quad (34)$$

ただし

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_0 & \\ & \mathbf{U}_1 \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_0 & \\ & \Sigma_1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{pmatrix} \mathbf{V}_0^T \\ \mathbf{V}_1^T \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_0 & \\ & \mathbf{A}_1 \end{pmatrix}.$$

式(34)と式(26)の第一項を比較すると

$$\mathbf{B} = \mathbf{U} \Sigma^{1/2} \mathbf{A}. \quad (35)$$

この関係を式(32)に代入して

$$\begin{aligned}\mathbf{H} &= \mathbf{C} \mathbf{C}^T \\ &= \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1} \Sigma^{-1} \mathbf{A}^{-T} \mathbf{B}^T \\ &= \mathbf{B} (\mathbf{A}^T \Sigma \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}^T \\ &= \mathbf{B} (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T.\end{aligned}\quad (36)$$

更に、式(24)を式(36)に代入して

$$\begin{aligned}\mathbf{H} &= \begin{pmatrix} \mathbf{B}_0 & \\ & \mathbf{B}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\mathbf{B}_0^T \mathbf{B}_0)^{-1} & \\ & (\mathbf{B}_1^T \mathbf{B}_1)^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{B}_0^T & \\ & \mathbf{B}_1^T \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{B}_0 (\mathbf{B}_0^T \mathbf{B}_0)^{-1} \mathbf{B}_0^T & \\ & \mathbf{B}_1 (\mathbf{B}_1^T \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{B}_1^T \end{pmatrix}.\end{aligned}\quad (37)$$

を得る。この意味するところは正準型輝度行列 \mathbf{I} に対する正準型表面行列 \mathbf{H} は非常に整った対角ブロック形式を取るということである。従って、同一の光源の組に照射される特徴点の組は各ブロックに対応することになる。これにより、異なった組合せの光源に照射された特徴点群を分類する問題は、表面行列 \mathbf{H} の行と列の各々の組を同時に並べ替えて、ブロック形式に対角化された正準型表面行列 \mathbf{H} を生成する問題と等価であることが分かる。

表面行列対角化部301では、表面行列生成部300で生成した表面行列 $\mathbf{I-I}$ のブロック形式への対角化を行う。ここでブロックの数、つまり特徴点群の輝度が帰属する輝度部分空間の数 m に関しては、特徴点群の分類に先立って輝度行列ランク r を計算することで求められる。すなわち $r=3m$ である。

【0110】計測した特徴点の輝度に雑音を含む環境では、表面行列 $\mathbf{I-I}$ の要素のうち異なる光源の組合せに照射された特徴点群に対応するものでも小さな非零値をもつ場合が考えられる。しかし、表面行列 $\mathbf{I-I}$ の対角化は、表面の相関エネルギーを表す量として H^2 を用い、 $\mathbf{I-I}$ の非対角成分のエネルギーを最小化するように全ての行と列の入れ替えを探索することで行う。この問題に対しては、簡単な最小化アルゴリズムで十分であるが、ヒルクライミング法や欲張り法などの探索法を用

いて効率を上げることも可能である。

【0111】続いて、輝度行列正準化部302では、表面行列対角化部301において表面行列 $\mathbf{I-I}$ の行と列の各々の組を並べ替えたのと、同じ順序で輝度行列 \mathbf{I} の行の入れ替えを行う。この結果、同一の光源に照射された特徴点が隣接した行に並ぶ輝度行列 \mathbf{I} の正準型輝度行列を生成することができる。

【0112】そして、得られた部分輝度行列の各々に対して独立に輝度行列変形操作部32以降の処理を施すことで、対応する線形結合係数及び光源の方向 s_0 と s_1 を計算する。以上の処理は2点光源の場合だけでなく任意点光源に対しても適応できる。

【0113】次に距離情報検出部4の詳細な構成例について、図12を用いて説明する。

【0114】基本的な概念は動画像中からある基本画像

を選択し、この画像中で顔に相当する部分の各画素において他の画像との幾何的輝度拘束—幾何学的に対応する点における輝度間に成立する線形拘束—にしたがって距離を推定するものであり、前記 3 次元動き情報抽出部 2 と前記画像間線形結合計算部 3 の結果の双方を利用するものである。この概念は図 7 に 4 枚の時系列画像を用いて示されるごとくである。

【0115】すなわち、1 番目の画像において顔表面のある点 $\times i$ が投影された画素の輝度 $I_i(1)$ を考えるとき、その点 $\times i$ への距離 Z を仮定、これにし

たがって同じ点 $\times i$ が異なる時点の画像において投*

まず 3 次元基底要素計算部 40 において、上記 $I_i(j)$ ($j=1\ldots 4$) をまとめて $I_i(j; Z)$ と記すと、画像間線形結合計算部 3 によって光源の異なる組合せに対する複数の線形結合係数 \hat{s} が求まっているため、その各々とのあいだに

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{\mathbf{B}}_i^T(Z) \hat{s} \quad (38)$$

なる拘束式が成立する。ただし 3 次元ベクトル $\hat{\mathbf{B}}_i^T(Z)$ は、式 (40) を最小 2 乗の意味でもっと良く満足する解として計算によって求められる。

$$\hat{\mathbf{B}}_i^T(Z) = \mathbf{I}_i^T(j; Z) \mathbf{s}^T (\mathbf{s} \mathbf{s}^T)^{-1} \quad (39)$$

次に、評価関数計算部 41 においては、上記により得られた 3 次元ベクトル $\hat{\mathbf{B}}_i^T(Z)$ と上記線形結合係数 \hat{s} によって合成される輝度の推定値 $\hat{I}_i^T(j; Z)$ 、すなわち

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{\mathbf{B}}_i^T(Z) \hat{s} \quad (40)$$

と実際の輝度 $I_i^T(j; Z)$ との自乗誤差に基づいた次式による評価関数 $E_i(Z)$ を計算する。

$$E_i(Z) = \sum_{j=1}^4 (I_i(j; Z) - \hat{I}_i(j; Z))^2 \quad (41)$$

ここで評価関数 $E_i(Z)$ は光源の異なる組合せに対する複数の線形結合係数について計算し、その最も小さい値を選択する。

【0118】距離判定部 42 では、推測の距離 Z を変化させつつ上記評価関数 $E_i(Z)$ の計算を行い、評価関数を最小（理想的には零）とする Z をもってその点での距離とする。以上の操作を画像上の各点において実行することで画像全体の距離画像を得る。

【0119】変更例 2

なお、本発明は上記実施形態で記載した内容に限定されるものではない。

【0120】光源についてはさらに、ここで記述した複数の点光源における議論を基に、その組合せとして一般光源へ拡張した環境へも対応することが可能である。このように本発明は物体の幾何的条件と光学的条件を組み合わせることにより様々な拡張が可能である。

【0121】

【発明の効果】本発明によれば、複雑形状かつ動きのある物体の形状復元を、実用的な精度と処理速度を満足して行うための画像処理方法及びその装置を提供すること

* 影された輝度 $I_i(2)$, $I_i(3)$, $I_i(4)$ を推測し、これらの輝度が、前記画像間線形結合計算部 3 で計算された線形結合係数に基づいた線形結合を正しく満たす度合いを評価することで、正しい距離 Z を探索によって求めることができる。

【0116】ある距離 Z を仮定するときこれに対する 3 次元基底要素計算部 40 と評価関数計算部 41 は以下のように構成する。

【0117】

【数 33】

をまとめて $I_i(j; Z)$ と記すと、画像間線形結合計算部 3 によって光源の異なる組合せに対する複数の線形結合係数 \hat{s} が求まっているため、その各々とのあいだに

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{\mathbf{B}}_i^T(Z) \hat{s} \quad (38)$$

なる拘束式が成立する。ただし 3 次元ベクトル $\hat{\mathbf{B}}_i^T(Z)$ は、式 (40) を最小 2 乗の意味でもっと良く満足する解として計算によって求められる。

$$\hat{\mathbf{B}}_i^T(Z) = \mathbf{I}_i^T(j; Z) \mathbf{s}^T (\mathbf{s} \mathbf{s}^T)^{-1} \quad (39)$$

次に、評価関数計算部 41 においては、上記により得られた 3 次元ベクトル $\hat{\mathbf{B}}_i^T(Z)$ と上記線形結合係数 \hat{s} によって合成される輝度の推定値 $\hat{I}_i^T(j; Z)$ 、すなわち

$$\hat{I}_i^T(j; Z) = \hat{\mathbf{B}}_i^T(Z) \hat{s} \quad (40)$$

と実際の輝度 $I_i^T(j; Z)$ との自乗誤差に基づいた次式による評価関数 $E_i(Z)$ を計算する。

$$E_i(Z) = \sum_{j=1}^4 (I_i(j; Z) - \hat{I}_i(j; Z))^2 \quad (41)$$

が可能となり、3 次元 CAD、また 3 次元 CG（コンピュータグラフィクス）を用いた映像作成等の技術に、大きく貢献する。

【0122】また、本発明によれば、光源が一つに限らず、複数の光源にも対応できる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】(a) 本発明の第 1 の実施形態の基本的な構成を示すブロック図である。

(b) (a) の全体構成を示すブロック図である。

【図 2】図 1 の特徴点抽出部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 3】図 1 の 3 次元動き抽出部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 4】図 3 の特徴点对応づけ部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 5】図 1 の画像間線形結合計算部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 6】図 1 の距離情報検出部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 7】図 6 の距離情報検出部において用いられる幾何

学的輝度拘束を示すスケッチ図である。

【図 8】物体の表面反射モデルを示すスケッチ図である。

【図 9】第 2 の実施形態の画像処理装置の全体構成を示すブロック図である。

【図 10】第 2 の実施形態の画像間線形結合計算部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 11】輝度行列分割部の詳細な構成を示すブロック図である。

【図 12】距離情報検出部の詳細な構成を示すブロック図である。

【符号の説明】

0 画像取込部

1 特徴点抽出部

2 3次元動き情報抽出部

3 画像間線形結合計算部

4 距離情報検出部

10 平滑化処理部

11 2次元空間差分処理部

12 孤立特徴点抽出部

13 局所マスク設定部

* 14 方向別分散値検出部

15 連結特徴点抽出部

20 特徴点对応づけ部

21 計測行列設定部

22 計測行列変形操作部

200 特徴点对選択部

201 局所マスク設定部

202 相関値計算部

203 対応判定部

31 輝度行列設定部

32 輝度行列変形操作部

33 光源方向推定部

300 表面行列生成部

301 表面行列対角化部

302 輝度行列正準化部

40 3次元基底画素計算部

41 評価関数計算部

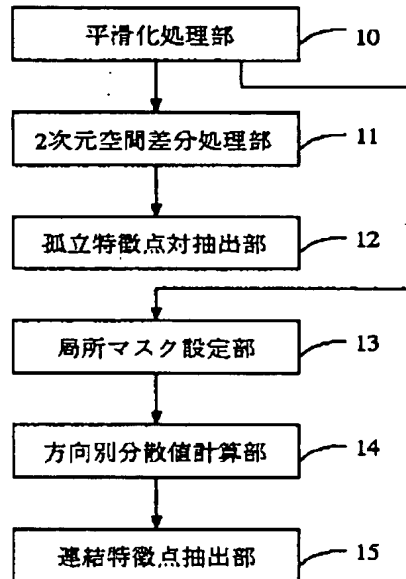
42 距離判定部

43 法線ベクトル計算部

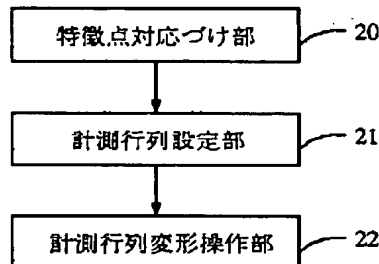
20 44 距離補正部

*

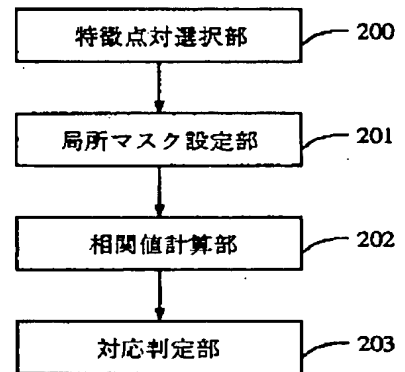
【図 2】



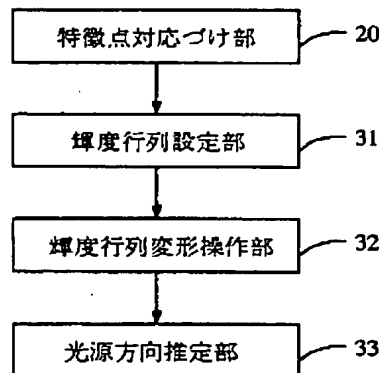
【図 3】



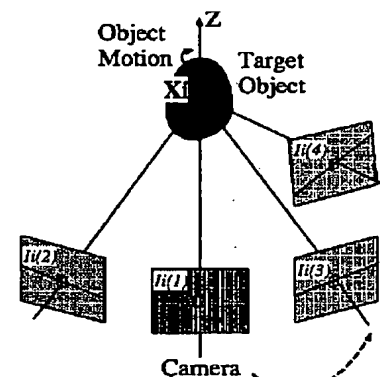
【図 4】



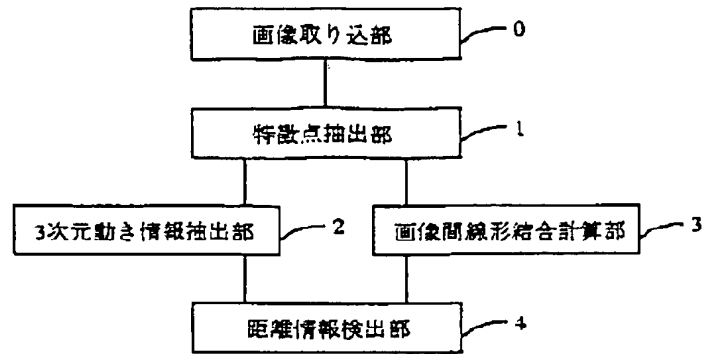
【図 5】



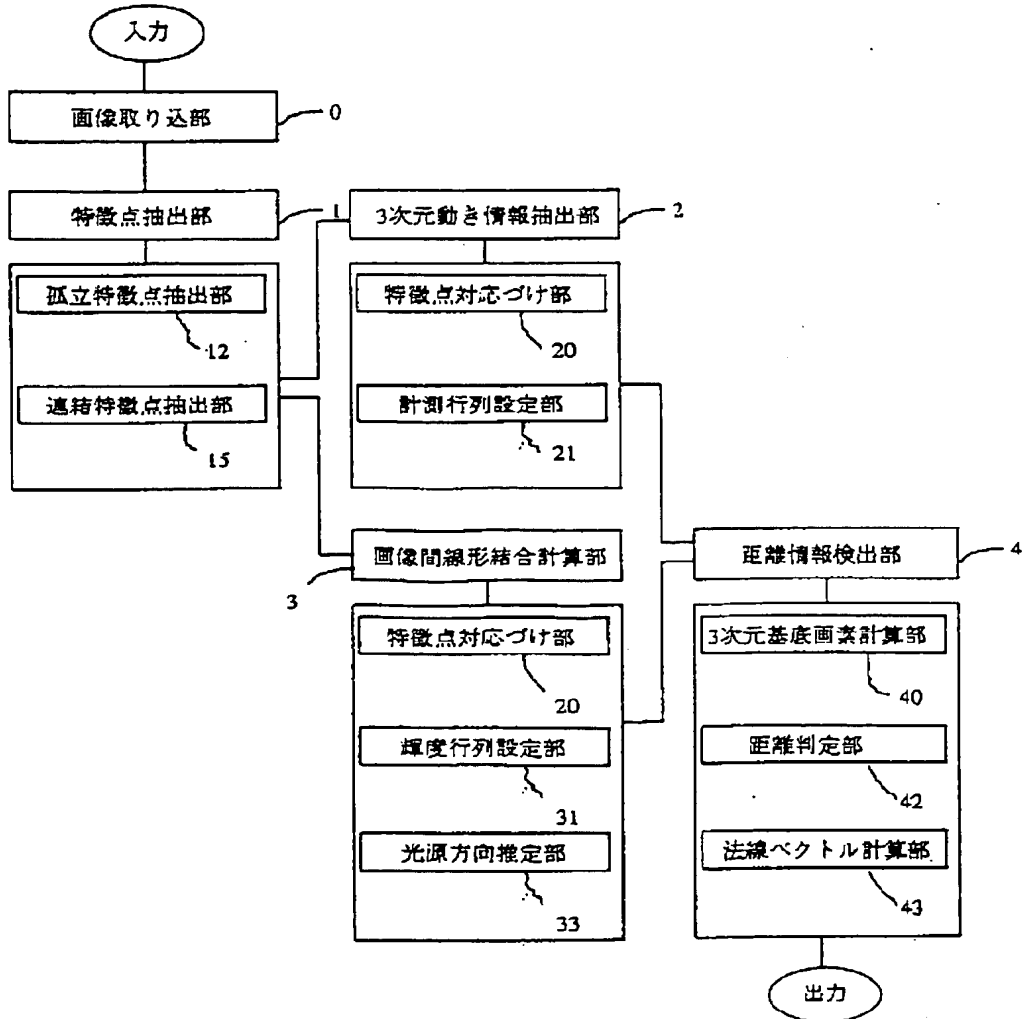
【図 7】



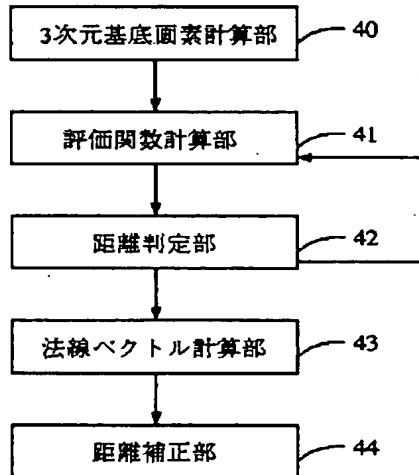
【図1】



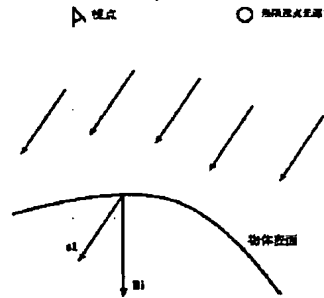
(b)



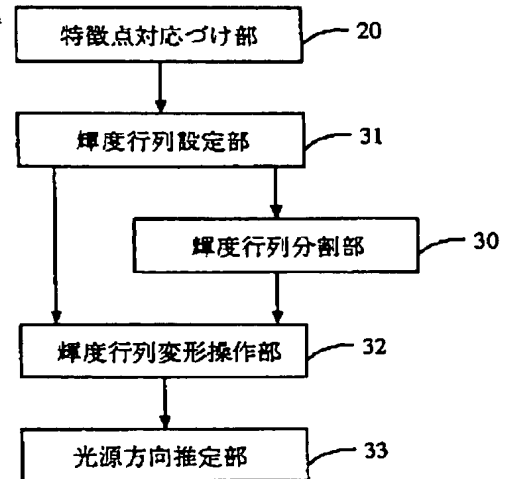
【図6】



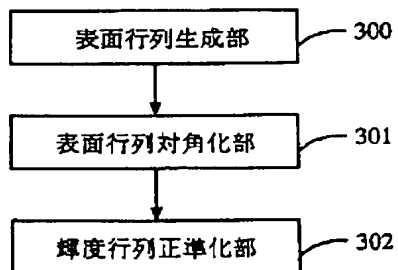
【図8】



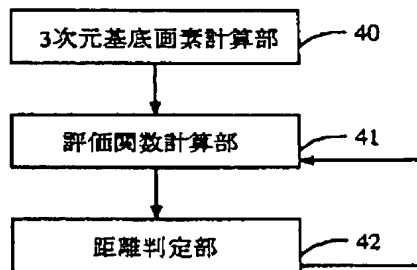
【図10】



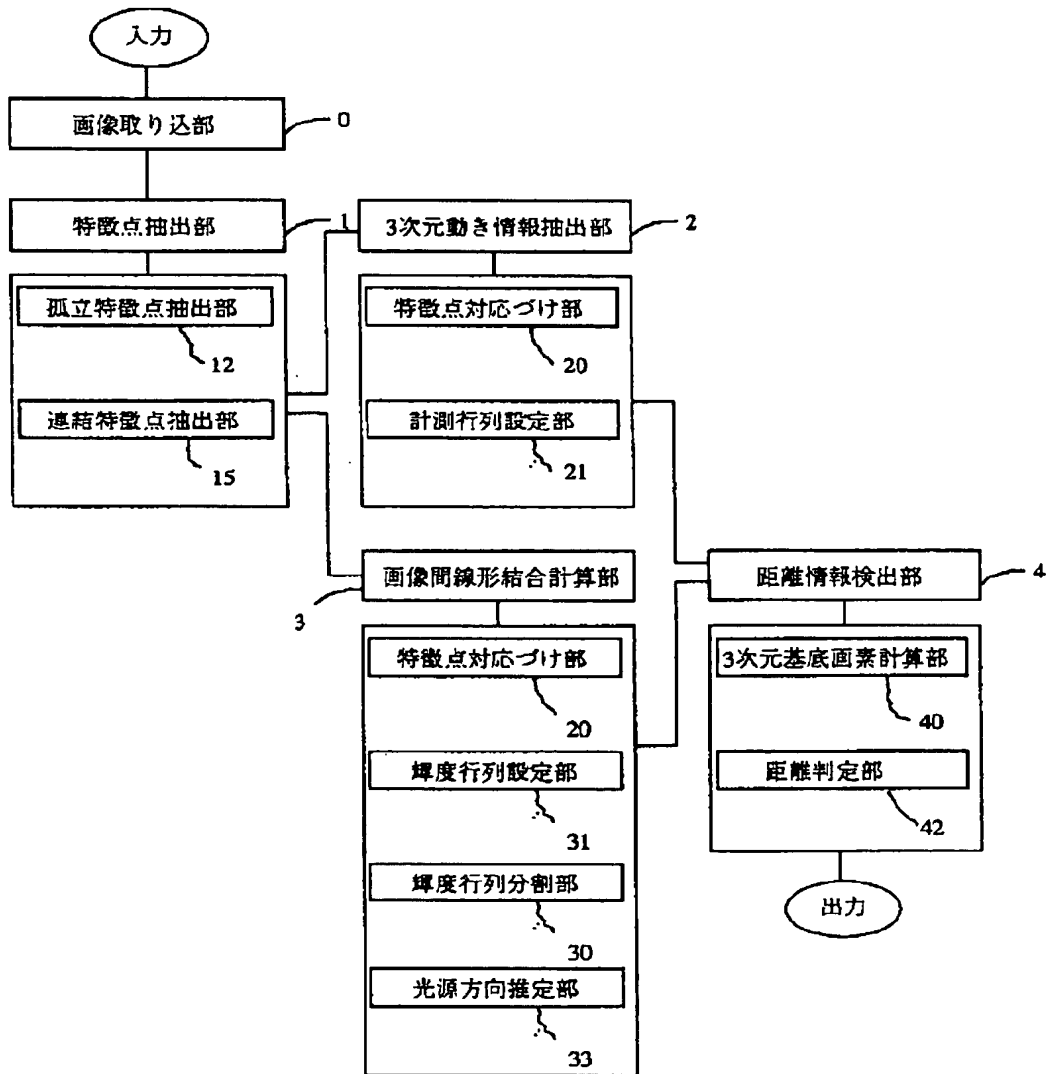
【図11】



【図12】



【図9】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA04 AA06 AA35 AA37 AA53
 BB05 BB15 CC16 DD06 EE05
 FF04 FF42 JJ03 JJ26 QQ00
 QQ03 QQ13 QQ23 QQ24 QQ25
 QQ27 QQ28 QQ32 QQ33 QQ41
 QQ45
 5B057 AA20 BA02 CA08 CA12 CA16
 CE05 DA20 DC05 DC08 DC36
 5C061 AA20 AB03 AB08
 5L096 BA20 CA04 EA06 FA06 FA10
 FA60 GA07 GA10 HA03